

文章编号: 1001-2486(2003)01-0065-03

# 基于 CZT 算法的水声扩频多普勒匹配方法\*

陈建云, 王跃科, 刘 辉

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 阐述了基于 DS/SS(直接序列扩频)的高分辨率扩频自导声纳系统的一种多普勒匹配方法。通过理论分析和仿真计算,证明基于 CZT 多普勒频偏匹配算法可以在极低信噪比条件下有效估计多普勒频偏和目标速度。

**关键词:** 直接序列扩频; 扩频自导声纳; CZT 算法

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## A Doppler Matched Method of High Resolution Auto-guide Sonar System Based on CZT Algorithm

CHEN Jian-yun, WANG Yue-ke, LIU Hui

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A Doppler matched method of high resolution auto-guide sonar system is proposed. The algorithm presented and the simulation results show that the algorithm can estimate Doppler frequency offset and the target speed in very low SNR condition.

**Key words:** direct sequence spread spectrum; spread spectrum auto-navigation sonar; CZT algorithm

现代自导声纳结合水声传播特点,采用了包括脉冲压缩和波束成形等水声处理技术,提高了探测能力。自导声纳系统进一步发展的关键在于,选择适应环境和目标特性,能最大限度抑制干扰的最佳信号形式和最佳时空信号处理方法,包括选用复杂形式的宽带信号、高分辨率时空信号处理和自适应滤波等技术来进一步提高声纳检测和识别目标的能力。

直接序列扩频技术(DS/SS)在雷达、通讯、测控定位领域中有着广泛的应用。采用直接序列相位编码信号的脉冲压缩雷达具有良好的测距、测速精度与分辨率,是一种适应现代电子战环境的雷达体制。在测控定位领域,使用 DS/SS 技术的全球定位系统得到广泛应用<sup>[1]</sup>。本文尝试将 DS/SS 技术引入自导声纳信号设计领域,利用其优良的特性来完成水下目标的探测和参数估计。

### 1 声纳波形设计的考虑

传统的声纳自导系统利用单频脉冲信号和线性调频信号。单频脉冲信号不具有大的时宽频宽积,在测距或测速上存在测量模糊性。线性调频信号虽然具有大时宽频宽积,但是在测量中存在距离和速度的耦合误差,在距离和速度均未知的情况下,只能准确测得联合值,而不能单独确定距离或速度<sup>[2,3]</sup>。将伪随机编码作为调制信号的直接序列扩频信号有大时宽频宽积,模糊函数为针尖状,具有最佳的测距测速性能。此外非常重要的一点是,在水声对抗环境下,单频脉冲和线性调频信号抗干扰能力差,而直接序列扩频信号具有良好的抗干扰能力,是一种水声对抗环境下性能优良的信号形式。由模糊函数计算得到直接序列扩频信号的脉冲压缩比为码长,扩频码越长,距离分辨率越高;多普勒频率分辨率为信号持续时间的倒数,扩频信号持续时间越长,频率分辨率越高。

\* 收稿日期: 2002-08-28

作者简介: 陈建云(1975-),男,博士生。

## 2 水声扩频信号的多普勒匹配技术

水声自导系统探测目标一般均为高速运动目标,因此接收信号有多普勒频偏。由于水中声速(约1500m/s)比雷达无线电波波速小约 $10^5$ 倍,尽管声纳目标速度要比雷达目标速度可能小20到30倍,但声纳回波的多普勒系数还是比雷达的大得多。这种声纳回波的严重多普勒现象,使得自导声纳需要更复杂的多普勒匹配技术来实现动目标的检测性能。

当存在多普勒频偏时,直接序列扩频信号的相关输出性能急剧变坏,这从伪随机序列所具有的针尖状模糊函数可以得到很好的解释。为了避免多普勒失调对匹配滤波器性能的影响,可以用对应不同多普勒频率的一组匹配滤波器来搜索多普勒频偏<sup>[5]</sup>。采用扩频码码长 $M$ 为511的 $m$ 序列,扩频信号中心频率 $f_c$ 为30kHz,扩频速率 $f_p$ 为10kHz。采样率 $f_s$ 为100kHz,设水中声速为1500m/s,目标速度 $v_0$

在0~20m/s范围内变化时,则可能的多普勒频偏为 $0 \sim 2 \frac{v_{\max}}{C} f_c$ 。假设用 $\Delta f = \frac{f_p}{2M}$ 作为单位搜索量,每采样一个数据,就对上述多普勒频偏范围进行搜索,当第 $k$ 个搜索匹配滤波器输出相关值出现峰值时,说明已经接收了完整的扩频序列,并且此时的频率为已补偿多普勒频偏的中心频率,即 $k \cdot \Delta f = \frac{2v_0}{C} f_c$ 。

则可能的最大搜索步数为 $K = \frac{f_c 4M}{f_p C} v_{\max}$ 。根据上面给出的相关参数可以计算得出 $K$ 约为82。速度的分辨率由单位搜索量决定,即 $\Delta v = \frac{f_p C}{f_c 4M} = 0.25 \text{m/s}$ 。因为每采样一个点需计算 $K$ 次搜索,每次搜索

需计算 $\Sigma = M \frac{f_s}{f_p}$ 个乘加,则计算量为 $K f_s \Sigma$ ,计算量极大,工程实现非常困难。因此要对上述搜索算法作进一步分析来改进算法。假设搜索的最小频率间隔为 $\Delta f$ ,第 $k$ 个匹配滤波器可以表述为

$$h^k(n) = PN(n) e^{-j2\pi f_c n T_s} \cdot e^{-j2\pi k \Delta f n T_s} = y(n) \cdot e^{-j2\pi k \Delta f n T_s}$$

若令 $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ,其中 $N = M f_p$ 为序列采样点数,则上式可写为

$$h^k(n) = y(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N} n k} = y(n) \cdot W^{nk}$$

其中旋转因子 $W^{nk} = e^{-j\frac{2\pi}{N} n k}$ ,若接收信号为 $x(n)$ ,则第 $k$ 个匹配滤波器输出为

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) h^k(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) y(n) W^{nk} = \sum_{n=0}^{N-1} z(n) W^{nk}$$

可以看出, $R(k)$ 实际是 $z(n)$ 的DFT变换,这样利用FFT快速算法可以实现水声扩频自导的频偏快速搜索,计算量要比直接进行搜索计算有极大的下降。但进一步分析发现,上述计算中多普勒频率的分辨率

为 $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ,分辨率太低,不能实现高分辨率测速。另一方面上述计算得到的 $R(k)$ 所表示的多普勒频偏范围高至 $f_s$ ,实际中水声自导系统是不可能碰到如此高的多普勒频偏,也就是说,上述计算的绝大部分结果是无意义的,我们实际只是对 $0 \sim 2 \frac{v_{\max}}{C} f_c$ 内的频段感兴趣,希望在该范围内频率的抽样率能够

非常密集,以提高分辨率,而带外则不予考虑。由此考虑采用CZT(线性调频 $z$ 变换)而不是DFT来进行计算。CZT能够描述出感兴趣频段的精细谱结构<sup>[4]</sup>,因此可以将上述计算中的多普勒频率的分辨率细化 $\alpha$ 倍,以适应实际相对速度造成的频偏频段,则有关系式 $\frac{f_s}{\alpha N} = \frac{2v_{\max}}{C} f_c$ ,计算得到 $\alpha$ 近似取为128。相应的CZT的计算表达式为 $X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{\alpha N} n k}$ 。此时得到的多普勒频率分辨率提高了 $\alpha$ 倍。

根据以上分析和相关参数,仿真计算了基于DFT和CZT算法在相对速度为10m/s时对多普勒频率和速度的估计,计算点数为5110点DFT和CZT。图1、2为DFT计算结果,图3、4为CZT计算结果,其中图1、3没有背景噪声,图2、4仿真了接收信噪比-20dB的情况。图中纵坐标表示匹配滤波器的输出,横坐标表示的相对速度范围为0~20m/s。可以看到,CZT计算结果主峰尖锐,即使在极低信噪比条件下

依然能够对目标速度取得良好的估计。

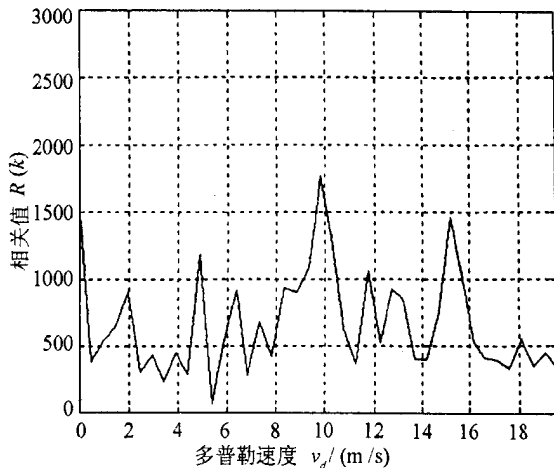
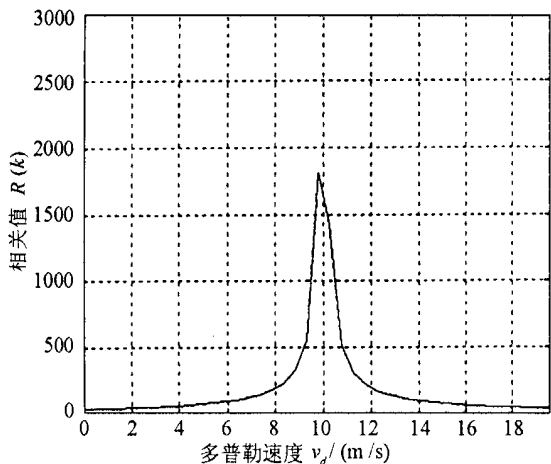


图 1 基于 DFT 多普勒匹配搜索(无背景噪声)

图 2 基于 DFT 多普勒匹配搜索(信噪比-20dB)

Fig. 1 Doppler matched filter based on DFT(no noise)

Fig. 2 Doppler matched filter based on DFT(SNR= -20dB)

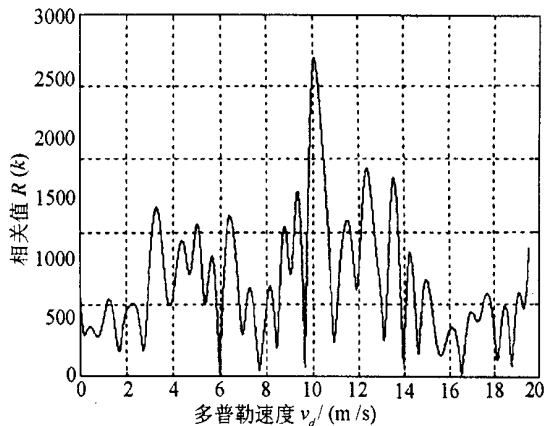
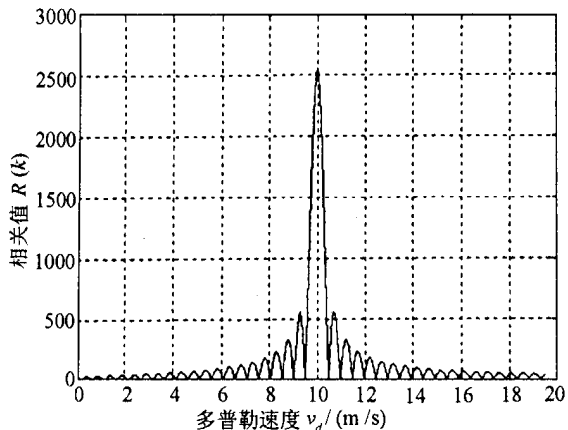


图 3 基于 CZT 多普勒匹配搜索(无背景噪声)

图 4 基于 CZT 多普勒匹配搜索(信噪比-20dB)

Fig. 3 Doppler matched filter based on CZT(no noise)

Fig. 4 Doppler matched filter based on CZT(SNR= -20dB)

### 3 结论

本文的理论分析和仿真计算证明,利用提出的基于 CZT 的扩频自导多普勒频偏搜索算法可以有效地估计出多普勒频偏和目标速度,克服了扩频测距中的多谱勒频偏造成自相关值恶化的问题,提高了多普勒频偏和目标速度的分辨率。

### 参考文献:

[1] 沈允春. 扩谱技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995: 253- 267, 274- 284.  
 [2] 肖国有,屠庆平. 声信号处理及其应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1994: 41- 44.  
 [3] 候自强,李贵斌. 声纳信号处理——原理与设备[M]. 北京:海洋出版社, 1986: 107- 111.  
 [4] 陈佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社,1995: 241- 246.  
 [5] Zejak A J, Dukic M L, Zatkalik J A. Doppler Mismatched Filters with Periodical Sequences in Spread Spectrum Communication Systems[J]. Spread Spectrum Techniques and Applications, 1994 IEEE ISSSTA '94: 539- 543.